

Réservoirs de stockage : Méthodologie de calcul et analyse sécuritaire

F. MAJID^a, M.LAHLOU^a, M.EL GHORBA^a, A.HACHIM^a

a. Ecole Nationale Supérieure d'Electricité et de Mécanique de Casablanca (ENSEM),
Laboratoire Mécanique de contrôle et de caractérisation des matériaux et des structures,
majidfatima9@gmail.com

Résumé :

Cet article couvre les méthodologies de dimensionnement des réservoirs de stockages utilisés dans les industries de procédés typiques. Il aide les ingénieurs et les chercheurs à comprendre la conception de base d'un réservoir de stockage sous la pression atmosphérique et enrichi leurs connaissances dans la sélection des normes adaptées et le dimensionnement selon les spécifications du code API 650. Il existe plusieurs types de réservoirs distingués par la pression à supporter, la température de fonctionnement et la sécurité à prévoir. La sélection de l'un ou l'autre de ces réservoirs dépend des réglementations environnementales, de l'emplacement géographique et des matériaux utilisés.

La théorie de dimensionnement et de conception des réservoirs est bien très détaillée dans les différents codes et normes en vigueur (API, ASME, CODAP, ...) [1][2][3][4], ainsi que les normes de choix des matériaux (EN 10025 OU EN 10028) [5][6].

Un cas pratique présentant, le calcul d'un réservoir de stockage atmosphérique en guidant le lecteur pas à pas à faire le calcul et le dimensionnement du réservoir en se basant sur le cas d'un réservoir industriel de stockage de fuel. Dans cet exemple nous avons montré le dimensionnement des viroles d'épaisseur variable en fonction de la distribution de contrainte qui est forte en bas du réservoir.

Un réservoir industriel doit travailler en toute sécurité dans son environnement. De ce fait, une analyse THO (Technique, Humain et Organisationnelle) a été faite pour mettre le point sur les causes probables d'explosion et donner un aperçu du volet sécurité des réservoirs de stockage.

Abstract:

This paper covers the methodologies of design of storage tanks used in the typical process industries. It helps engineers and researchers to understand the basic design of a storage tank at atmospheric pressure and increases their knowledge in the selection of appropriate codes and to design a storage tank as specified by the API code 650.

There are several types of tanks distinguished by the pressure to bear, the operating temperature and the safety system to predict. The selection of one or the other of these tanks depends on environmental regulations, the geographic location and the used materials.

The design theory and tanks design is very detailed in various codes and standards (API, ASME, CODAP ...) [1] [2] [3][4] as well as the standards of material selection (EN 10025 or EN 10028) [5] [6].

A practical case that's giving the calculation of an atmospheric storage tank guiding the reader step by step to understand analysis and design of the storage tank based on the case of an industrial fuel

one. In this example we show the design of variable shell thickness depending on the stress distribution that is strong at the bottom of the tank.

An industrial tank must work safely in its environment. Therefore, an analysis THO (Technical, Human and Organizational) was made to explore the probable causes of explosion and provide an overview of the safety component of the storage tanks.

Mots clefs : API 650, Dimensionnement des réservoirs de stockage, Sécurité des réservoirs de stockage, Analyse THO.

1 Introduction

Afin de concevoir une structure en toute sécurité, l'analyse de son comportement sous différents variété de chargement est importante. La première étape pour analyser le comportement de la structure face aux différentes charges est l'analyse de contraintes qui peut être réalisée de différentes méthodes théorique, numérique et expérimentale.

Les réservoirs sont parmi les moyens de stockage les plus utilisés dans de nombreuses industries, notamment dans les industries pétrolières, gazières et pétrochimiques. Ils peuvent être de forme cylindrique, sphérique. Ils sont aériens ou enterrés, horizontaux ou verticaux, en fonction de la nature du produit stockée, son environnement et son utilisation. Les réservoirs sont plus complexes en matière de dimensionnement, d'étude et de prise en charge du volet sécurité. Ils sont en interaction avec le produit stocké, l'environnement extérieur tel que les conditions climatique.

Un réservoir est un équipement dangereux, en attente d'un dysfonctionnement interne ou externe pour exploser. Cet accident nous rappelle les précautions à prendre lors de l'utilisation de tel enceinte et la nécessité d'aller au-delà de la norme et de la convention pour approfondir l'étude technique détaillée, développer de nouveaux concepts dans le cadre de performance et de résolution des problèmes et créer une vision plus dynamique et méthodique dans le cadre de la maintenance prédictive et autonome.

2 Types des réservoirs

Les réservoirs sont classés en trois grands groupes selon la pression de fonctionnement ou de la pression interne. Les réservoirs de stockage atmosphériques qui sont utilisés pour une pression de fonctionnement ou interne de moins de 18 kPa et gérés par l'API standard 650 [1]. Les réservoirs de stockage à basse pression $18 \text{ kPa} < P < 100 \text{ kPa}$ et gérés par l'API standard 620 [2]. Les réservoirs sous pression dont la pression de fonctionnement ou pression interne est $P > 100 \text{ kPa}$ et gérés par l'ASME Sec VIII [3].

3 Dimensionnement d'un réservoir de stockage

- Définition des hypothèses de calcul

La définition des hypothèses de calcul passe par :

- ✓ Géométrie du réservoir :

La description de la géométrie du réservoir se fait à partir du cahier des charges client ou à partir d'un besoin client bien exprimé qui contient un plan de détail du réservoir ou simplement à partir des données géométrique voulu.

✓ Conditions du site :

Selon l'emplacement du réservoir, il ya des normes de vent et de séisme relatif à chaque pays et à chaque région qui définissent la zone, la pression du vent et du séisme et la classe de l'ouvrage.

✓ Conditions de service :

Les conditions de service englobe la densité du produit, la température, la pression, la dépression, la surpression qui émanent de l'exploitant final.

▪ Choix de matériaux :

Le matériau utilisé est généralement imposé par l'utilisateur final .Dans tout cas la confirmation du choix ou la proposition d'un nouveau matériau est indispensable suivant les normes en vigueur : les codes de calcul des réservoirs atmosphériques API 650, CODAP ou les normes des matériaux EN 10025 OU EN 10028.

▪ Définition des codes de calcul :

C'est une étape importante du dimensionnement, parfois l'exploitant ou le constructeur à ses préférences par rapport au choix de la norme de calcul, sinon l'application :

- ✓ Choix du code de calcul du réservoir : CODAP, ASME, API,
- ✓ Choix de calcul des normes de séisme et du vent adéquates,
- ✓ Choix du code de calcul des événements et des oreilles de levage s'ils ne sont pas intégrés dans le code de calcul choisis,
- ✓ Trouver la réglementation adéquate pour l'installation des dépôts d'hydrocarbure

▪ Calcul des épaisseurs des viroles :

Pour calculer les épaisseurs des viroles il faut définir le nombre des viroles, les limites admissibles des viroles, les hauteurs du liquide pour chaque virole et les épaisseurs des viroles.

▪ Calcul de l'épaisseur de la bordure annulaire :

Deux informations sont calculées, L'épaisseur minimale et la Largeur de la bordure annulaire.

▪ Calcul de la charpente du toit :

Dans cette partie nous calculons le rayon de courbure du toit, le nombre de chevron du toit et nous entamons la vérification des déformations et la vérification de la résistance du toit.

▪ Vérification Au Séisme :

Après avoir choisi la norme adéquate nous procédons au calcul du poids, au calcul du coefficient sismique d'accélération, au calcul des moments de renversement, au calcul de l'effort sismique et à la vérification de la résistance au renversement.

▪ Vérification Au vent :

Après avoir choisi la norme adéquate nous procédons au calcul de la vitesse maximale, au calcul du moment de renversement, au calcul de la stabilité au vent, au calcul de la pression de soulèvement et au calcul des raidisseurs intermédiaires le cas échéant.

- Calcul des oreilles de levage.
- Calcul des événements ou des soupapes de sécurité.

Ce calcul se fait vis-à-vis de la dépression et de la surpression.

- Calcul des réchauffeurs de masse :

Le réchauffeur de masse est un serpentin qui est conçu pour apporter au fluide de stockage la puissance calorifique nécessaire pour compenser les déperditions et maintenir une température donnée.

- Calculer le circuit de la mousse et de l'eau des réservoirs :

Pour assurer la protection contre le risque d'incendie du réservoir ou de l'ensemble dépôt d'hydrocarbure il faut dimensionner le circuit incendie et déterminer les équipements anti-incendie nécessaires à l'aide de dimensionnement hydraulique.

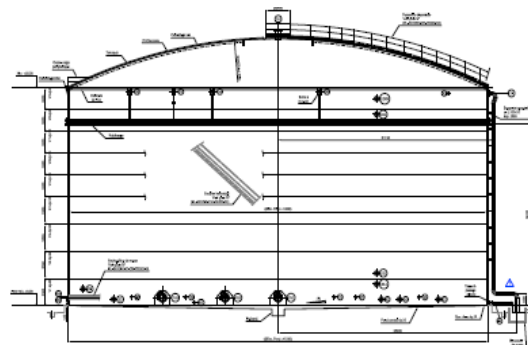
- Calcul de la cuvette de rétention :

Pour une bonne implantation du réservoir, le calcul de la cuvette de rétention est nécessaire afin de limiter la propagation du feu, de drainer les fuites inattendus.

4 Cas pratique

4.1 Caractéristiques géométriques des réservoirs

<u>Données</u>	<u>Valeur</u>
Diamètre du réservoir	41 m
Hauteur du réservoir	10 m
Volume	13000 m ³
Forme du toit	Hémisphérique
Conditions d'étude	Densité de calcul = 0.98 ; Température = 50°C
Matériaux	S355JR



4.2 Caractéristiques du matériau de construction

Le matériau utilisé est l'acier S355, dont les caractéristiques sont les suivantes :

La limite d'élasticité	235 MPa
La résistance à la traction	340MPa (API-650 5.6.2.1)
Coefficient de poisson	0.3
Masse volumique	7850 kg/m ³

4.3 Calcul des épaisseurs du réservoir suivant API 650

Après le calcul des limites admissibles des matériaux suivant les paragraphes 3.3.2 de la norme API 650, l'adoption d'une surépaisseur de corrosion CA = 1mm et l'adoption du fuel comme liquide de stockage on trouve :

$$S_{d_i} := \min \left(\left(\frac{2}{3} \cdot S_{235JR_y} \right), \left(\frac{2}{5} \cdot S_{235JR_t} \right) \right) \quad S_{t_i} := \min \left(\left(\frac{3}{4} \cdot S_{235JR_y} \right), \left(\frac{3}{7} \cdot S_{235JR_t} \right) \right)$$

Les épaisseurs varient de haut au bas suivant la position de la virole et sont calculées suivant le paragraphe 3.6.3 de l'API 650 comme suit :

$$t_{d_i} := \left[\frac{4.9 \cdot D \cdot (H_i - 0.3) \cdot G}{S_{d_i}} + CA \right]$$

Item	Epaisseur (t _d)	Hauteur(H)	Matériau
1	26 mm	2500 mm	S235JR
2	26 mm	2500 mm	S235JR
3	22 mm	2500 mm	S235JR
4	18 mm	2500 mm	S235JR
5	16 mm	2000 mm	S235JR
6	12 mm	2000 mm	S235JR
7	10 mm	2000 mm	S235JR
8	6 mm	2000 mm	S235JR
9	6 mm	2000 mm	S235JR

Avec :

La limite d'élasticité S235JR_y := 235 MPa

La résistance à la traction S235JR_r := 340MPa (API-650 5.6.2.1).

Densité du liquide G := 0.98

Surépaisseur de corrosion CA := 1mm (API-650 5.3.2).

4.4 Calcul de la bordure annulaire

Calcul de la contrainte pendant les essais hydrostatique

$$S_h := \frac{4.9D \cdot (H_0 - 0.3)}{t_0} \cdot \text{MPa}$$

Et à partir du tableau 3.1 de la norme API 650 et de l'épaisseur maximale de la première virole nous trouvons l'épaisseur minimale de la bordure annulaire qui est de 6 mm + CA = 7 mm.

Par la suite nous calculons la largeur minimale de la bordure annulaire comme suit :

$$b_a := \max \left[\frac{600 \cdot \text{mm} + t_0 + 50 \cdot \text{mm}}{(H_0 \cdot G)^{0.5}} \cdot \text{mm}, \frac{215 \cdot t_{b.\min}}{(H_0 \cdot G)^{0.5}} \cdot \text{mm} \right] \quad \text{Alors :} \quad b_a = 676 \cdot \text{mm}$$

4.5 Vérification de la charpente de toit

Pour vérifier la charpente dans le cas d'un toit fixe la norme prévoit à partir du diamètre du réservoir le calcul du rayon de courbure et du nombre de chevrons comme suit :

$$R_{\text{toit}} := 1.2 \cdot D$$

$$R_{\text{toit}} = 49.2 \text{ m}$$

$$N_c := \text{plafond} \left(\left(\frac{\pi \cdot D}{1.8 \cdot \text{m}} \right) \right) \quad N_c = 72 \quad (\S 3.10.4.4)$$

4.6 Vérification au séisme

La première étape consiste à calculer le poids effectif du produit oscillant (W_i) et le poids convectif d'une fraction de liquide (W_c) :

$$W_i := \text{si} \left(\left(\frac{D}{H_0} > 1.33 \right), \frac{\text{th} \left(0.866 \cdot \frac{D}{H_0} \right)}{0.866 \cdot \frac{D}{H_0}} \cdot W_p, \left(1 - 0.218 \cdot \frac{D}{H_0} \right) W_p \right]$$

$$W_i = 1.32 \times 10^8 \cdot \text{N}$$

$$W_c := 0.23 \cdot \frac{D}{H_0} \cdot \text{th} \left(3.67 \cdot \frac{H_0}{D} \right) \cdot W_p$$

$$W_c = 1.15 \times 10^8 \cdot \text{N}$$

Ou W_p est le poids total du liquide dans le réservoir, H_0 est la hauteur de la première virole et D est le diamètre du réservoir.

La deuxième étape consiste à déterminer les coefficients d'accélération séismique impulsif (A_i) et convectif (A_c) comme suit :

$$A_i = \max \left[\frac{2.5 \cdot Q \cdot F_a \cdot S_p \cdot \left(\frac{I}{R_{wi}} \right)}{0.007} \right]$$

$$A_c = 2.5 \cdot Q \cdot F_a \cdot S_p \cdot \left(\frac{T_s}{T_c} \right) \cdot \left(\frac{I}{R_{wi}} \right)$$

Tel que :

Le facteur d'échelle Q:	$Q := \frac{2}{3}$
Le coefficient d'accélération sismique du site:	$S_p := 0.08$
Le coefficient d'accélération de base du site à 0.2 s:	$F_a := 2.5$
Le facteur d'importance:	$I := 1.3$
Le facteur de réduction de la force impulsive:	$R_{wi} := 3.5$

Le coefficient K_s :	$K_s := \frac{0.578}{\sqrt{\tanh\left(\frac{3.68H_0}{D}\right)}}$	$K_s = 0.596$
La période propre:	$T_c := 1.8 K_s \sqrt{D}$	$T_c = 6.864$
Le coefficient d'accélération S_1 :	$S_1 := 1.25 \cdot S_p$	$S_1 = 0.1$
Le coefficient d'accélération S_S :	$S_S := 2.5 \cdot S_p$	$S_S = 0.2$
Le coefficient de vitesse de base du site à 1 s:	$F_v := 3.5$	
La période:	$T_S := \frac{F_v \cdot S_1}{F_a \cdot S_S}$	$T_S = 0.7$
Le facteur de réduction de la force convective:	$R_{wc} := 2$	

En troisième étape nous vérifions la résistance au renversement, en déterminant les moments de renversement de la robe et du toit .

5 Analyse qualitative des causes probables d'explosion des réservoirs

De nombreux accidents graves sont survenus à la suite d'explosion d'un équipement à l'origine de multiples incendies secondaires [4], des explosions de nuages de vapeur [5] [6] [7] ou des explosions de conteneurs [8]

Les causes d'explosion d'un réservoir sous pression qui respecte les critères généraux des normes de calcul et de sécurité sont multiples et peuvent être classés en famille THO (Techniques, Humain et Organisationnels) en tenant en compte :

- La nature du produit stocké ;
- Les conditions de stockage ;
- Le choix de matériaux ;
- Les conditions de sécurité ;
- Le choix de l'instrumentation adéquate ;

- L'environnement du réservoir.

Nature de la cause	Détail du problème	Cause probable
T	Incendie	<ul style="list-style-type: none"> • Maintenance circuit de détection et d'extinction automatique du feu. • Absence de simulation du fonctionnement des systèmes d'extinction du feu.
	Montée en pression	<ul style="list-style-type: none"> • Défaillance d'une soupape. • Défaillance d'un événement.
	Réduction de la résistance	<ul style="list-style-type: none"> • Fatigue du matériau du réservoir. • Fluage du réservoir.
	Défaillance de l'automatisme de control de la pression	<ul style="list-style-type: none"> • Non control d'une surpression à cause de la défaillance d'un instrument (Réservoir avec remplissage dynamique).
H	Sur-remplissage du réservoir	<ul style="list-style-type: none"> • Utilisation du réservoir en surcapacité et dépassement des limites de dimensionnement
	Réduction du volume suite à un accident	<ul style="list-style-type: none"> • Déformation et réduction du volume du réservoir suite à un choc extérieur
O	Non planification de l'étalonnage des soupapes de sécurité	<ul style="list-style-type: none"> • Non-respect de la pression admissible sans de tarage de la soupape
	Qualification des personnes intervenant sur les réservoirs.	<ul style="list-style-type: none"> • Ignorance de philosophie d'opération du réservoir dans son environnement

6 Conclusion

Le dimensionnement d'un réservoir est une étape délicate nécessitant un savoir faire pointu pour répondre aux exigences de la norme et de la réglementation en vigueur. La prise en charge du volet sécurité est primordiale et nécessite des réflexions qui dépassent l'étude à l'utilisation finale pour se rendre compte de toutes les éventualités et éviter la défaillance.

Références

- [1] API STD 620. Recommended rules for design and construction of large, welded, low-pressure storage tanks. Washington, DC, USA: American petroleum institute 2012.
- [2] API STD 650. Welded tanks for oil storage. Washington, DC, USA: American petroleum institute 2010.
- [3] ASME STD Sec VIII. Rules for construction of pressure vessels. New York. American society of mechanical engineers 2013.
- [4] BARPI, 1992, 1999
- [5] Conseil incident majeur Investigation, 2007
- [6] Evanno, 2001
- [7] CSB, 2007
- [8] BARPI, 1999